

**Circuit de commande à modulation en largeur d'impulsions  
pour machine électrique multi mode et machine électrique  
multi mode équipée d'un tel circuit de commande**

**5    DOMAINE DE L'INVENTION**

La présente invention concerne un circuit de commande à Modulation en Largeur d'Impulsions (MLI) pour machine électrique tournante multi mode, telle que par exemple un alternateur-démarreur et une machine électrique multi mode équipée d'un tel  
10    circuit de commande.

**ETAT DE LA TECHNIQUE**

Il est apparu un besoin dans l'état de la technique qu'une même machine électrique multi modes puisse fonctionner successivement comme un démarreur du moteur thermique, comme un moteur, ou encore comme génératrice de courant  
15    continu pour recharger la batterie d'alimentation du réseau de bord, directement comme un alternateur de l'état de la technique, ou encore indirectement en coopérant dans un mode de fonctionnement du groupe motopropulseur permettant de  
20    récupérer l'énergie mécanique de freinage. Cependant, la conception électromécanique de la machine électrique favorise ou bien un fonctionnement en mode alternateur ou bien un fonctionnement en mode moteur optimisé en couple réglé. Il en résulte que le rendement global et les performances d'une  
25    machine électrique qui a été conçue pour fonctionner en génératrice de courant et qui travaille en mode moteur sera toujours inférieur au rendement global d'une machine électrique conçue pour fonctionner en moteur, et inversement.

Dans l'état de la technique, on a déjà proposé, notamment  
30    dans la demande FR-A-2.745.445 au nom du demandeur, d'utiliser un alternateur aussi comme un démarreur à l'aide d'un circuit convertisseur capable d'amener une pleine onde aux

enroulements du stator de la machine électrique seulement lors d'une séquence de démarrage. Mais un tel circuit de commande ne peut délivrer assez de courant lorsque l'on veut travailler à vitesse de rotation réduite, par exemple lorsque la machine électrique doit travailler comme moteur d'assistance du groupe motopropulseur.

La présente invention apporte une solution au problème de la conception d'une machine unique permettant de fonctionner comme démarreur du moteur thermique, comme moteur électrique d'entraînement couplé au reste du groupe motopropulseur et aux roues d'entraînement du véhicule, dans un mode d'assistance ou d'augmentation (« boost ») du couple ou de la puissance motrice, ou encore comme génératrice électrique, fonctionnant en alternateur ou en récupération d'énergie mécanique de freinage.

Particulièrement, dans l'industrie automobile, la tension continue d'alimentation du réseau de bord peut différer selon les modèles. On connaît les alimentations en 6 volts, 12 volts, 24 V et même 48 volts. La conception électromécanique d'une machine électrique adaptée à fonctionner sur un quelconque réseau de bord impose des compromis qui modifient sa performance.

La présente invention apporte une solution au problème de l'adaptation d'une machine électrique pouvant fonctionner comme moteur ou génératrice sur un réseau d'alimentation continue de divers standards.

## **OBJET DE L'INVENTION**

Pour porter remède à ces inconvénients de l'état de la technique la présente invention propose un circuit de commande à modulation de largeur d'impulsion MLI pour machine électrique polyphasée destinée à être montée sur le groupe motopropulseur d'un véhicule, circuit du genre comportant :

- un pont hacheur connecté entre deux bornes d'alimentation continue et dont chaque borne commandée est destinée à être

connectée à au moins une phase du stator de la machine électrique ;

- une pluralité de capteurs destinés à mesurer le courant et/ou la tension dans chaque phase de ladite machine électrique ;
- 5 - - un moyen pour produire une information instantanée sur la position et la vitesse de rotation du rotor de la machine électrique ;
- un circuit de pilotage des branches du pont en fonction des mesures électriques dans les phases et/ou de la position et de la
- 10 vitesse du rotor ;

Le circuit de commande de l'invention comporte aussi un circuit générateur de signaux de configuration du circuit de pilotage des branches du pont en fonction du mode désiré de fonctionnement de la machine électrique pris parmi les modes de

15 fonctionnement comme démarreur, moteur électrique d'entraînement, moteur électrique d'assistance du moteur à combustion interne, alternateur ou alternateur de récupération d'énergie mécanique de freinage.

La présente invention concerne aussi une nouvelle

20 machine électrique pour véhicule, pouvant fonctionner comme démarreur, moteur électrique d'entraînement, moteur électrique d'assistance du moteur à combustion interne, alternateur ou alternateur de récupération d'énergie mécanique de freinage et adaptée à fonctionner avec un circuit de commande selon

25 l'invention. L'invention consiste en ce que la machine électrique comporte un stator bobiné dont le nombre de spires est calculé sur la base d'une énergie de magnétisation plus faible avec un nombre de spires au stator plus faible et en ce que pour les modes de fonctionnement demandant une énergie de

30 magnétisation plus élevée on applique un contrôle en courant du stator au moyen du circuit de commande.

## BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres avantages et caractéristiques de la présente invention seront mieux compris à l'aide de la description et des dessins annexés parmi lesquels :

- 5       - la figure 1 est un schéma bloc représentant un mode de réalisation du circuit de l'invention ;
- la figure 2 est un schéma bloc représentant une partie du circuit de la figure 1 ;
- les figures 3 à 6 représentent des diagrammes définissant
- 10       différents modes de commande du circuit de l'invention.

## DESCRIPTION DE MODES PREFERENTIELS DE REALISATION DE L'INVENTION

A la figure 1, on a représenté le schéma bloc d'un mode de réalisation particulier du circuit de l'invention. La machine

15   électrique 1 comporte essentiellement un stator 2 équipé d'une pluralité d'enroulements de fils conducteurs, ou phases, selon des géométries de dispositions de bobines électriques qui permettent de concevoir ainsi qu'il est connu de l'homme de métier une machine électrique tournante particulière dotée d'un rotor 3

20   tournant à l'intérieur du stator.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 1, le stator 2 est équipé de trois enroulements, non représentés, qui peuvent être montés avec un point commun (en étoile) ou qui sont connectés successivement les uns aux autres (en triangle), ou encore par

25   des bobinages connectés en étoile triangle. Chaque point d'alimentation d'un enroulement du stator 2 est connecté à la borne commandée d'une branche 16, 17 ou 18 d'un pont 4. Le pont 4 est un élément essentiel du convertisseur de courant alternatif nécessaire pour alimenter la machine électrique en

30   moteur, ou pour convertir le courant produit par elle quand elle fonctionne en génératrice (alternateur) en courant continu du fait de sa connexion au réseau de bord connecté à la batterie du véhicule par les bornes positive 29P et négative 29N.

Une branche de pont 4, comme la branche 16, est constituée de la mise en série de deux interrupteurs semi-conducteurs 16 et 16' dont les bornes de commande de mise en conduction sont connectées à des sorties de commande P1 et P2 d'un circuit de pilotage 14. Classiquement, un interrupteur semi-conducteur comme l'interrupteur 16 est composé d'un transistor de type MOS 20 dont le chemin de conduction entre les électrodes de drain et de source présente une diode antiparallèle 21 intrinsèque. L'électrode de commande de l'interrupteur semi-conducteur est constituée par l'électrode de grille du transistor 20. Selon les tensions appliquées à cette électrode de grille, l'interrupteur 16 est dans un état passant ou dans un état de forte impédance dans lequel aucun courant ne traverse le chemin direct du drain vers la source. Cependant, à cause du caractère fortement inductif des enroulements du stator 2, des tensions rapidement variables apparaissent entre les diverses polarités continues d'alimentation du pont 4 et la borne commandée de chaque branche du pont 4. C'est l'une des fonctions du circuit de pilotage 14 et de chaque diode intrinsèque comme la diode 21 de réduire l'effet d'engorgement de tensions de commutation. Les mesures mises en œuvre dans le circuit de pilotage 14 ne seront pas plus décrit et sont à la portée de l'homme de métier.

De même, le rotor 3 de la machine électrique 1 est couplé par un moyen électrique à un circuit électronique actif 5 qui permet de découper la tension continue du réseau de bord de façon à fournir des tensions électriques variables de manière contrôlée de façon à produire un mode de fonctionnement en moteur ou en génératrice de la machine électrique 1. Un tel circuit de découpage est principalement réalisé autour d'un interrupteur semi-conducteur (non représenté), dont l'électrode de commande de mise en conduction est alternativement portée à un potentiel d'activation ou à un potentiel de repos de façon à produire une onde de fréquence et d'amplitude déterminées. Dans un mode de réalisation, le circuit 5 est combiné avec l'étage de puissance du

circuit d'excitation du bobinage du rotor 3. Le circuit régulateur de cet étage de puissance peut être intégré dans le circuit 5.

Un arbre de rotation 8 est monté sur le rotor 3 de façon à transmettre le mouvement mécanique du rotor à un dispositif de  
5 couplage (non représenté) comportant un engrenage et/ou un dispositif à poulie et courroie qui sont couplés ainsi qu'il est connu de l'homme de métier au reste du groupe motopropulseur du véhicule, et particulièrement au vilebrequin du moteur thermique, notamment quand la machine électrique 1 fonctionne  
10 comme un démarreur ou comme un alternateur.

L'arbre de rotation 8 est couplé à un capteur de rotation 9 qui produit un signal représentatif de la rotation instantanée de rotation du rotor 8, signal qui est traité par un circuit 10 de détection de rotation. Le circuit 10 de détection de rotation produit  
15 un premier signal  $\theta$  représentatif de l'angle de rotation instantanée du rotor par rapport à une position de référence. Le circuit 10 de détection de rotation produit un second signal  $\omega$  représentatif de la vitesse angulaire de rotation du rotor.

Les deux signaux produits par le circuit 10 de détection de rotation sont transmis à des entrées d'un circuit 11 qui produit  
20 d'une part un signal de commande de commutation par une ligne 28 à destination du circuit hacheur 5 et d'autre part une pluralité de signaux de référence à destination d'un circuit 13 générateur de signaux de pilotage à destination du pont d'alimentation 4 du stator 2 de la machine électrique 1.  
25

Sur chacune des trois lignes d'alimentation des trois phases 23, 24 et 25 du stator 2 de la machine électrique 1 sont disposés des capteurs de courant, comme les capteurs 6 et 7, dont les signaux sont transmis à un circuit 12 de mise en forme et  
30 de mesure de courant dans les phases statoriques. Le circuit 12 de mise en forme et de mesure de courant dans les phases statoriques produit au moins deux signaux de mesure de courant statorique M1 et M2 qui sont transmis à des entrées convenables du circuit 13 générateur de signaux de pilotage. Selon un mode

de réalisation, la somme des courants statoriques est nulle parce que le stator est électriquement équilibré. Dans le cas d'une machine à N phases statoriques, le circuit de commande de l'invention comporte N-1 capteurs de courant et produit N-1  
5 signaux de référence. Dans d'autres modes de réalisation, la machine électrique n'est pas équilibrée et un capteur de courant est prévu pour chaque enroulement du stator.

Un circuit 15 générateur d'une onde de base est prévue dont une sortie est connectée à une borne d'entrée du circuit 13  
10 générateur de signaux de pilotage. Dans un mode particulier de réalisation, l'onde de base est constituée par une onde de forme triangulaire, qui présente un premier front croissant à une première vitesse et un second front décroissant à une seconde vitesse. De manière préférée, la première vitesse est plus faible  
15 que la seconde vitesse. D'autres formes d'onde de base sont prévues dans la présente invention.

Le circuit 13 générateur de signaux de pilotage produit trois signaux de pilotage C1, C2 et C3 qui sont connectés à des entrées d'un circuit d'adaptation 14 essentiellement constitué par  
20 des amplificateurs qui permettent aux signaux de pilotage de commander par des signaux de mise en conduction P1 à P6 les grilles des différents interrupteurs semi-conducteurs du pont 4. et qui sont produits par :

- une borne de sortie d'un signal de commande P1 de mise  
25 en conduction de l'interrupteur semi-conducteur 16 du côté de tension élevée de la première branche du pont 4 associé au premier enroulement 23 du stator 2 de la machine électrique 1 ;

- une borne de sortie d'un signal de commande P3 de mise  
en conduction de l'interrupteur semi-conducteur 17 du côté de  
30 tension élevée de la seconde branche du pont 4 associé au second enroulement 24 du stator 2 de la machine électrique 1 ;

- une borne de sortie d'un signal de commande P5 de mise  
en conduction de l'interrupteur semi-conducteur 18 du côté de  
tension élevée de la troisième branche du pont 4 associé au

troisième enroulement 25 du stator 2 de la machine électrique 1 et

- les trois bornes de sortie P2, P4 et P6 de commande de conduction des interrupteurs commandés comme l'interrupteur 16' de chacune des trois branches du pont qui permettent la connexion d'un enroulement à la ligne de masse par la borne 29N qui travaillent chacune selon la loi de commande appliquée à la borne P1 ou P3 ou P5 ainsi qu'il est connu.

On doit comprendre que, pour les trois interrupteurs disposés au point froid de chaque branche du pont 4, le circuit 14 génère des signaux correspondants sur le même principe. Particulièrement, ces signaux sont directement obtenus sur une borne de sortie complémentaire de chaque comparateur 33, 36 ou 38. Cette disposition permet aussi en fonction des corrections nécessaires dans les schémas de commutation du pont 4 d'ajouter des circuits ajoutant des retards dans les commutations en fonction de boucles de contrôle supplémentaires non représentés ici et de fournir une commande d'un niveau suffisant pour faire changer l'état de conduction de chaque interrupteur commandé à l'électrode de grille duquel la borne de sortie du circuit 14 est connectée.

A la figure 2, on a représenté un mode particulier de réalisation d'un circuit 13 générateur de signaux de pilotage selon l'invention. A la figure 2, les éléments analogues à ceux de la figure 1 portent les mêmes numéros de référence et ne sont pas plus décrits. Le circuit 13 présente cinq bornes d'entrée qui sont respectivement :

- une borne d'entrée d'un signal de référence S1 issu du circuit 11 ;
- une borne d'entrée d'un signal de mesure M1 issu du circuit de mesure de courant ;
- une borne d'entrée d'un signal de référence S2 issu du circuit 11 ;



- une borne d'entrée d'un signal de mesure M2 issu du circuit de mesure de courant ;

- une borne d'entrée du signal de pilotage issu du circuit 15 générateur de signal de pilotage.

5 Le circuit 13 présente trois bornes de sortie qui sont respectivement :

- une borne de sortie d'un signal de commande C1 destiné à commander la commutation de la première branche du pont 4 associée au premier bobinage statorique 23 ;

10 - une borne de sortie d'un signal de commande C2 destiné à commander la commutation de la seconde branche du pont 4 associée au second bobinage statorique 24 ;

- une borne de sortie d'un signal de commande C3 destiné à commander la commutation de la troisième branche du pont 4  
15 associée au troisième bobinage statorique 25.

Le circuit 13 comporte un premier soustracteur 31 dont une première borne d'entrée positive est connectée à la borne d'entrée du premier signal de référence S1 et dont une seconde borne d'entrée négative est connectée à la borne d'entrée du premier signal de mesure. La borne de sortie du premier soustracteur 31 est connectée à une borne d'entrée d'un circuit de correction 32 qui applique une fonction de correction F1() qui est présenté à la sortie du circuit de correction 32 sous la forme :

20

$$A1 = F1(S1 - M1).$$

25 Dans un mode particulier de réalisation, la fonction de correction F1() applique un facteur de type multiplicatif F1, prédéterminé et enregistré dans le circuit de correction selon les caractéristiques électrodynamiques de la machine électrique 1, selon la relation :

30 
$$A1 = F1 \times (S1 - M1).$$

Le signal de sortie A1 (non représenté) issu du circuit de correction 32 est appliqué à une première borne d'entrée d'un comparateur 33 dont une seconde borne d'entrée de comparaison est connectée à la sortie du circuit 15 générateur du signal de

pilotage, préférentiellement de forme triangulaire. La borne de sortie du comparateur 33 délivre un signal qui bascule d'un état inactif par exemple de 0 V, à un signal actif par exemple correspondant à la tension d'alimentation du comparateur pour  
5 faire changer l'état de conduction de l'interrupteur commandé 16 à l'électrode de grille duquel la borne de sortie du comparateur 33 est connectée.

Le circuit 13 comporte un second soustracteur 34 dont une première borne d'entrée positive est connectée à la borne  
10 d'entrée du second signal de référence S2 et dont une seconde borne d'entrée négative est connectée à la borne d'entrée du second signal de mesure M2. La borne de sortie du second soustracteur 34 est connectée à une borne d'entrée d'un circuit de correction 35 qui applique une fonction de correction F2() qui  
15 est présenté à la sortie du circuit de correction 35 sous la forme :

$$A2 = F2(S2 - M2).$$

Dans un mode particulier de réalisation, la fonction de correction F2() applique un facteur de type multiplicatif F2, prédéterminé est enregistrée dans le circuit de correction selon  
20 les caractéristiques électrodynamiques de la machine électrique 1, selon la relation :

$$A2 = F2 \times (S2 - M2).$$

Le signal de sortie A2 (non représenté) issu du circuit de correction 35 est appliqué à une première borne d'entrée d'un  
25 comparateur 36 dont une seconde borne d'entrée de comparaison est connectée à la sortie du circuit 15 générateur du signal de pilotage, préférentiellement de forme triangulaire. La borne de sortie du comparateur 36 délivre un signal qui bascule d'un état inactif par exemple de 0 V, à un signal actif par exemple  
30 correspondant à la tension d'alimentation du comparateur et d'un niveau suffisant pour faire changer l'état de conduction de l'interrupteur commandé 18 à l'électrode de grille duquel la borne de sortie du comparateur 36 est connectée.

Les bornes de sortie des deux circuits de correction 32 et 35 sont aussi connectées à des bornes d'entrées respectives d'un additionneur 37 dont la borne de sortie est appliquée à une première borne d'entrée d'un comparateur 38 dont une seconde  
5 borne d'entrée de comparaison est connectée à la sortie du circuit 15 générateur du signal de pilotage, préférentiellement de forme triangulaire. La borne de sortie du comparateur 38 délivre un signal qui bascule d'un état inactif par exemple de 0 V, à un signal actif par exemple correspondant à la tension d'alimentation  
10 du comparateur.

A la figure 3, on a représenté six diagrammes temporels (a) à (f) expliquant le fonctionnement du circuit 13 générateur des signaux de commande appliqués aux électrodes de commande du pont 4 à travers le circuit amplificateur 14. Pour l'une quelconque  
15 des phases i des enroulements statoriques, l'onde en dents de scie représentée à la figure 3(a) passe lentement d'une valeur nulle à une valeur  $V_{MLI, M}$  maximale, puis redescend avec une vitesse aussi rapide que possible à la valeur nulle pendant une période T. Cette onde est connectée par l'intermédiaire du  
20 générateur 15 à la seconde borne d'entrée des comparateurs du circuit 13. L'onde en dents de scie est générée identiquement à elle-même sous une fréquence  $F = 1/T$  déterminée en fonction des caractéristiques électrodynamiques de la machine électrique.

Périodiquement, à chaque période T, soit successivement  
25 aux dates  $pT$ ,  $(p+1)T$ ,  $(p+2)T$  représentées en abscisses, le signal de différence, affecté le cas échéant de sa correction, soit :

$$A_i = F_i(M_i - S_i)$$

est comparé pendant la durée de la période correspondante à l'onde triangulaire en cours d'augmentation. Quand les deux  
30 valeurs, soit la valeur V correspondant à la valeur instantanée de tension d'un l'onde triangulaire et la valeur  $A_{i,p}$  du signal de différence corrigée lors de la p-ième période, sont détectées égales par le comparateur aux bornes d'entrée desquels six valeurs sont appliquées, le comparateur place sa sortie à l'état

actif, ce qui est représenté aux différents instants  $t_p$ ,  $t_{p+1}$  et  $t_{p+2}$ . Puis, le comparateur repasse presque instantanément à l'état inactif pour la nouvelle période ainsi qu'il est représenté à la figure 3b.

5        Aux diagrammes (c) et (d), on a représenté un second mode de réalisation d'un signal de commande à l'aide d'une onde de référence sous forme d'une onde triangulaire dans laquelle, en fonction des pentes montante et descendante et du niveau maximal de référence  $V_{MLI}$ , M il est possible de faire varier une  
10        date de début de conduction  $t_p$  et une date de fin de conduction  $t'_p$  à chaque période  $p$  de l'onde de référence. Quand le signal de mesure  $M_{i,p}$  devient supérieur au signal de référence le circuit 13 bascule une sortie  $C_i$  à une valeur active à la date  $t_p$  et quand le signal de référence  $M_{i,p}$  redevient inférieur au signal de référence  
15         $S_i$ , le circuit 13 replace sa sortie  $C_i$  à l'état inactif à la date  $t'_p$ .

Une telle forme d'onde réduit les harmoniques car les commutations entre phases ne sont plus simultanées.

Aux diagrammes (e) et (f), on a représenté un troisième mode de réalisation d'un signal de commande à l'aide d'une onde  
20        de référence sous forme d'une onde trapézoïdale dans laquelle, en fonction des pentes montante et descendante et du niveau maximal de référence  $V_{MLI}$ , M il est possible de faire varier une date de début de conduction  $t_p$  et une date de fin de conduction  $t'_p$  à chaque période  $p$  de l'onde de référence selon le même  
25        mécanisme qu'aux diagrammes précités. Cependant, la partie à tension constante  $V_{MLI,i}$  de chaque signal de référence  $S_i$  assure que une certaine durée de non changement d'état du pont 4 sera assurée ce qui évite certaines commutations anarchiques.

On réalise ainsi une modulation de largeur d'impulsion de  
30        fréquence déterminée qui peut être paramétrée lors de l'utilisation et de rapport cyclique variable en fonction du courant mesuré dans la phase ainsi que d'un signal de référence qui correspond au mode de fonctionnement de la machine électrique à la date de la comparaison effectuée dans le circuit 13.

À cet effet, le circuit 11 générateur de signaux de référence appliqués au circuit générateur 13 ainsi que du signal de commande 28 appliqué au circuit hacheur 5 d'alimentation des enroulements du rotor 3 comporte un moyen non représenté de  
5 détection du mode de fonctionnement de la machine électrique 1. Préférentiellement, le moyen de détection d'un mode de fonctionnement comporte un moyen de décodage d'une commande appliquée à la machine électrique à un ordinateur de bord décidant du fonctionnement parmi l'un des modes suivants :

- 10 - un mode de fonctionnement comme démarreur du moteur thermique ;
- un mode de fonctionnement comme alternateur pour recharger la batterie électrique connectée au réseau de bord d'alimentation en tension continue ;
- 15 - un mode de fonctionnement comme un moteur d'entraînement travaillant directement sur les roues du véhicule ou indirectement en venant additionner sa puissance mécanique fournie à la puissance mécanique fournit par le reste du groupe motopropulseur ;
- 20 - un mode de fonctionnement comme génératrice travaillant en récupération de l'énergie de freinage demandé par le groupe motopropulseur.

En pratique, une commande en couple positif ou négatif indique un mode alternateur ou moteur et la valeur fixe le niveau  
25 de puissance demandée. Dans un mode particulier de réalisation, une information intégrant une donnée comme la vitesse du véhicule est détecté sur le réseau de données circulant dans le véhicule comme un réseau CAN et est détectée par un module convenable connecté au bus CAN pour décoder ladite information  
30 autorisant ou non le passage en mode de démarreur du circuit de commande.

A chaque mode de fonctionnement de la machine électrique correspond notamment un programme différent de génération de signaux de référence S1, S2 et de signal de

commande If du hacheur 5 qui permet d'assurer, en fonction des paramètres de construction électrique de la machine électrique, un fonctionnement optimal de la machine électrique 1 en termes de couple appliqué sur l'arbre du rotor et/ou de vitesse de rotation.

On va maintenant décrire les principes de construction d'une machine électrique adaptée au circuit de commande de l'invention.

La machine électrique doit travailler et être optimisée pour les quatre modes définis ci-dessus de sorte que l'on puisse augmenter le rendement et les performances dynamiques de la machine.

Le circuit de commande de la machine qui a été décrit ci-dessus permet d'effectuer un contrôle interne complet des paramètres de fonctionnement électrique de la machine. La puissance délivrée par la machine est seulement limitée par l'énergie électrique disponible sur le réseau de bord (batterie), l'état énergétique du moteur thermique et l'environnement du véhicule (couples résistants sur les roues du véhicule notamment).

Dans les modes de fonctionnement moteur, et parmi ceux-ci dans les fonctions d'assistance en couple, la machine électrique doit maintenir un niveau de puissance mécanique maximale sur une large gamme de vitesse de rotation de la machine électrique. Ainsi, le couple mécanique en mode moteur est nécessaire pour assister le moteur thermique, mais également à plus haute vitesse en mode assistance au moteur thermique et dans la zone où le couple maximum est nécessaire. Particulièrement, les paramètres de construction de la machine électrique vont dépendre du rapport de réduction appliqué par le dispositif de couplage de la machine électrique au reste du notre propulseur.

Le couple appliqué dépend directement du courant qui traverse le rotor If et du courant qui traverse le stator Ir. Selon

l'invention, les équations qui permettent de déterminer le nombre ns de tours des bobines au stator sont déterminées par :

$$C = k \times I_f \times I_s$$

$$k = k' \times n_s$$

5           Ainsi, pour augmenter le couple disponible sur le rotor, il faut augmenter le courant dans le stator pour un nombre ns de tour des bobines au stator déterminé. Mais, pour une puissance dissipée déterminée, l'augmentation du courant statorique exige la réduction de la résistance de bobine en réduisant le nombre de  
10   tours et en augmentant la section conductrice des fils des enroulements du stator.

Dans le même temps, la réduction du nombre de tours ns des enroulements au stator entraîne une réduction de la valeur de la force électromotrice qui permet d'accepter un courant plus  
15   élevé dans les bobines au stator à cause de la relation :

$$E = k_1 \times I_f \times \Omega$$

dans laquelle k1 dépend du nombre ns de tours au stator. L'expression du couple C disponible au rotor est alors déterminée par la relation :

20            $C = k \times I_f \times (U_b - e)/r$

où Ub représente la tension entre les bornes 29P et 29N connectées au réseau de bord, e est la force électromotrice et r est la résistance au stator. La réduction du nombre de tours ns au stator entraîne une modification du circuit magnétique.

25           Dans le mode moteur, la réduction du nombre de tours ns au stator augmente la puissance aux vitesses élevées de rotation allant de 3000 à 7000 tours par minute pour des machines électriques classiquement utilisées pour un véhicule, mais cette réduction du nombre de spires diminue la puissance mécanique et  
30   donc le couple à basse vitesse inférieur à 1800 tours par minute ou le couple de démarrage est déterminé par la relation :

$$C = k \times n_s \times I_f \times I_s.$$

Dans ce cas aussi, il est possible de remédier à un tel inconvénient de structure de machine électrique en renforçant le

courant dans le stator à l'aide du circuit de commande de l'invention ainsi qu'il a été décrit à l'aide des figures précédentes.

Dans le mode de fonctionnement en démarreur, le courant dans le stator est déterminé par la relation :

5 
$$I_s = (U_b - e)/r$$

Ce courant est important et imposé par la résistance très faible des enroulements du stator. De ce fait, un contrôle de l'alimentation du stator en onde pleine imposerait un échauffement trop important. Selon l'invention, le circuit 11 propose alors un programme permettant de travailler en onde modulée en largeur d'impulsions MLI limitant le courant à des valeurs acceptables.

Dans le mode de fonctionnement en alternateur, au-delà d'une vitesse de rotation déterminée, l'existence d'un faible nombre de tours  $n_s$  au stator augmentera la puissance disponible au stator, mais réduira la force électromotrice à basse vitesse selon la relation :

$$e = k \times I_f \times n_s \times \Omega.$$

a) Cette force électromotrice n'est plus suffisante à faible vitesse et reste inférieure à la tension délivrée par la batterie et donc ne permet pas de créer de courant en mode alternateur.

b) Aux vitesses de rotation élevées, la faible force électromotrice  $e$  réduit la réaction d'induit ce qui augmente la puissance et le rendement.

25 Selon l'invention, une fois la machine électrique déterminée par ces paramètres principaux, le circuit de commande de l'invention permet de gérer trois paramètres pour contrôler le fonctionnement et le mode de fonctionnement de la machine électrique qui sont :

- 30
- Le courant d'excitation au rotor  $I_f$  ;
  - Le courant au stator  $I_s$  ; et
  - La phase électrique au stator  $\Psi$  qui est l'angle entre le courant dans la phase au stator et la tension et la tension dans la même phase au stator.



Le contrôle de ces trois paramètres permet d'obtenir des valeurs précises désirées de couple et de puissance mécanique. Le circuit de commande de l'invention limitera le courant demandé à la batterie particulièrement dans le mode de démarreur et  
5 maintiendra la tension de la batterie au-dessus de la moitié de sa valeur nominale. Dans ce cas, la batterie délivre sa puissance maximale.

Le couple positif maximum est obtenu quand la force électromotrice est en phase avec le courant imposé au stator sachant que sur l'ensemble de la gamme de fonctionnement de la  
10 machine électrique en mode moteur la phase électrique  $\Psi$  au stator peut varier de 0 à 90 degrés d'angle. Selon les notations utilisées ici, une valeur positive de couple signifie que la machine transforme de la puissance électrique en puissance mécanique.

A la figure 4, on a représenté un diagramme de fonctionnement d'une machine électrique connectée à un circuit de commande selon l'invention, dont le circuit 11 générateur de signaux de référence comporte un programme pour son  
15 fonctionnement en mode moteur selon deux zones dénommées zone A et zone B. Dans le mode de fonctionnement en moteur, la séparation entre les deux zones est déterminée par une vitesse limite  $\Omega_L$ , par exemple de 1.500 tours par minute.

Le moyen pour générer des signaux de référence pour le contrôle de la modulation en largeur d'impulsions est donc  
25 programmé selon au moins deux modes moteurs :

Un mode de démarreur représenté typiquement par une courbe de genre DEM ;

Un mode d'aide au groupe motopropulseur représenté typiquement par une courbe de genre ASS.

30 En mode démarreur DEM, le circuit de commande de l'invention détermine une modulation en largeur d'impulsions qui présente un couple de sortie constant pour une vitesse de rotation  $W$  variant de la vitesse nulle à une vitesse limite, puis qui

présente une décroissance à puissance constante jusqu'à une vitesse maximale.

En mode d'aide ASS, le circuit de commande de l'invention détermine une modulation en largeur d'impulsions qui présente un couple de sortie décroissant linéairement à partir d'une vitesse  
5 déterminée, dite vitesse de séparation  $\Omega_L$  entre deux zones A et B sur le graphique de la figure 4, vitesse correspondant avantageusement au ralenti du moteur thermique, jusqu'à environ 7.000 tours par minutes.

10 A la figure 5, on a représenté une configuration du circuit de commande de l'invention dans le mode de démarrage lorsque la machine commence à fonctionner en mode moteur qui comporte en plus un circuit 53 pour détecter quand la tension générée par la batterie 50 est supérieure à la moitié d'une valeur  
15 nominale  $U_0$  de fonctionnement de la batterie 50 avec une tension de garde  $\Delta U$  prédéterminée.

Le circuit 53 de détection est connectée par une borne d'entrée à la ligne positive d'alimentation 55 entre la batterie 50 et la partie à courant continu du circuit de conversion utilisée  
20 dans le circuit de commande de l'invention et par une borne de sortie à une borne d'entrée de configuration du circuit de commande.

En mode alternateur, quand la force électromotrice ne permet pas de dépasser la tension sur le réseau de bord due à la  
25 faiblesse relative du nombre de spires au stator et à la faible vitesse, le circuit de commande est programmé pour générer une surtension de compensation dans les enroulements pour dépasser la tension batterie et permettre ainsi à l'alternateur de débiter du courant. Le moyen pour commander la modulation en largeurs  
30 d'impulsion comporte un moyen pour produire des signaux de référence pour le contrôle du stator qui exploite comme arguments d'entrée le courant dans chaque phase du stator, le courant d'excitation dans le rotor et l'angle électrique dans chaque phase du stator.

Dans un mode particulier de réalisation, le moyen pour produire des signaux de référence pour le contrôle du stator comporte aussi un moyen pour recevoir une commande de configuration de charge, qui peut être fournie par un ordinateur de  
5 contrôle du groupe motopropulseur et/ou du véhicule complet pour déterminer si l'alternateur doit travailler à pleine charge ou à charge réduite.

Dans un mode particulier de réalisation, le moyen pour produire des signaux de référence pour le contrôle du stator  
10 comporte aussi un moyen pour placer le circuit de commande 13 dans un état tel que le pont 4 produise une onde sinusoïdale présentant une avance de phase  $\Psi$  comprise entre 90 et 180° d'angle.

A la figure 6, on a représenté une diagramme de la  
15 puissance électrique disponible aux bornes 29P et 29N du circuit convertisseur chargé par le stator 2 de la machine électrique 1 quand elle fonctionne dans un mode de génératrice, alternateur ou récupération d'énergie de freinage. Le circuit de commande de l'invention détermine par un moyen d'enregistrement d'une valeur  
20 limite  $\Omega D$  de la vitesse de rotation du rotor deux zones de fonctionnement en vitesses : une zone C pour les vitesses inférieures à la vitesse limite  $\Omega D$  et une zone D pour les vitesses supérieures à  $\Omega D$ . La vitesse limite est déterminée par le régime commun lorsque la machine travaille en modulation de largeur  
25 d'impulsions (partie de courbe 60) et lorsqu'elle travaille en redressement passif ou synchrone avec des diodes intrinsèques seulement (partie de courbe 62).

Le circuit de commande de l'invention comporte aussi un moyen pour faire travailler le circuit de conversion ou bien dans  
30 un régime en modulation de largeur d'impulsions pour les régimes inférieur à  $\Omega D$  et seulement en redressement par diodes pour les régimes supérieurs.

En se reportant à nouveau à la figure 1, le moyen 11 pour générer les signaux de référence S1 et S2 pour le contrôle du stator et le signal de commande If du courant rotorique a été représenté dans un mode particulier de réalisation dans lequel un circuit 27 comporte une mémoire de données dotée d'un moyen  
5 pour générer des séquences de données en fonction d'un argument basé sur la vitesse de rotation instantanée du rotor et du mode de fonctionnement choisie de la machine électrique. Particulièrement, un tel circuit peut être programmé selon les transformées de Clarke et de Park pour déterminer le triplet de  
10 paramètres  $\{I_p, I_f, \psi\}$  qui décrit l'état électrique du stator et du rotor dans divers repères tournants avec la vitesse de rotation instantanée du rotor élaborée par la borne de sortie correspondante du circuit 10. Le triplet  $\{I_p, I_f, \psi\}$  est alors  
15 transformé en un triplet  $\{I_s, I_r, \psi\}$  pour une commande analogique ou en un triplet  $\{I_d, I_q, I_r\}$  pour une commande numérique. A cet effet, le circuit 27 comporte un port d'entrée d'une donnée instantanée de vitesse de rotation du rotor qui est connecté à une borne de sortie convenable du circuit 10 et il produit un signal de  
20 commande représentatif du courant dans le stator :  $I_s$ , une indication de l'angle électrique représentatif de l'état relatif du stator par rapport au rotor et un signal de commande If représentatif de l'excitation au rotor.

Ce dernier signal If est transmis au circuit 5 de commande de l'excitation au rotor. Les deux premiers signaux  $I_s$  et  $\Psi$  sont  
25 transmis à deux premières portes d'entrée d'un circuit 26 dont une troisième porte est connectée à la sortie correspondante du circuit 10 qui élabore un signal représentatif de l'angle instantané de rotation du rotor  $\theta$ .

30 Le circuit 26 comporte un moyen pour produire une pluralité de signaux de référence S1, S2, ... pour déterminer la modulation en largeur d'impulsion à l'aide de l'onde de découpage produite par le circuit 15 ainsi qu'il a été décrit précédemment,

modulation qui permet de construire une onde sinusoïdale complète, une onde sinusoïdale partielle, une onde en relation angulaire déterminée pour chaque phase des enroulements du stator en réponse au triplet de commande appliqué aux trois  
5 portes d'entrée du circuit 26. Le circuit comporte donc des moyens pour générer des signaux de référence selon la relation courante définie par :

$$S_i = S_i(I_s, I_r, \psi)$$

Où  $S_i()$  est une fonction prédéterminée qui est dans un premier  
10 mode de réalisation réalisée sous forme d'un programme exécuté par un circuit de traitement de signal de genre DSP (Digital Signal Processing de type Harvard). Dans un second mode de réalisation, le signal de référence courant  $S_i()$  est généré par un séquenceur qui adresse, en fonction du triplet d'arguments ( $I_s$ ,  $\Psi$ ,  
15  $I_R$ ), une table de valeurs numériques représentant une cartographie déterminée par avance lors du chargement du circuit de commande de l'invention.

La machine électrique peut être une machine à rotor à griffes de type Lundel ou à pôles saillants, une machine à aimants  
20 permanents au rotor (auquel cas, le circuit 5 et le signal  $I_f$  ne sont pas concernés) une machine à induction ou à réluctance variable, une machine à griffes à aimants interpolaires, une machine à rotor hybride réalisé en tôles feuilletées et à pôles lisses avec bobinage d'excitation et des aimants permanents.

25 Le circuit de commande à modulation de largeur d'impulsions de l'invention permet de commander la machine électrique dans toute la gamme des vitesses de rotation du rotor. Il coopère séparément ou en combinaison avec :

- un moyen pour empêcher le calage du moteur thermique ;
- 30 - un moyen de régulation de la vitesse du véhicule dans le mode de démarrage,
- un moyen de régulation de la puissance électrique disponible sur le réseau de bord du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;

- un moyen de régulation de la puissance mécanique du groupe motopropulseur du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- un moyen de lissage des écarts de décélération et d'arrêt du  
5 véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- un moyen de lissage des variations de couple demandé au groupe motopropulseur du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- 10 - un moyen pour adapter le courant dans les phases de la machine électrique en fonction d'au moins l'état de charge de la batterie du véhicule, du niveau d'énergie thermique et de tout autre paramètre de mesure de l'environnement du véhicule.

On remarque que le contrôle apporté par l'invention assure  
15 un comportement dynamique rapide de la machine, une réduction du bruit magnétique de la machine électrique dans tous ses modes de fonctionnement, une réduction des émissions radiofréquences EMC, particulièrement en fonction de la résolution d'un compromis entre les pertes et la vitesse de  
20 commutation des interrupteurs commandés utilisés dans le circuit convertisseur.

On remarque que le circuit de commande de l'invention assure la production de courant sur toute la gamme de fonctionnement en vitesses en mode génératrice même à basses  
25 vitesses de rotation.

On remarque que le circuit de commande de l'invention assure le démarrage et l'assistance dans les modes DEM et ASS même à des vitesses élevées de rotation de l'ordre de 7.000 tours par minute.

30 L'ensemble de ces avantages est rendu possible même avec une machine électrique présentant un nombre réduit de tours aux enroulements au stator ce qui assure une réduction des pertes résistives de puissance.

La forme d'onde triangulaire peut être variée notamment au niveau des pentes de ses fronts montant et descendant. Elle peut être remplacée par une forme d'onde trapézoïdale ou encore avec un contrôle vectoriel de type FOC. La forme d'onde peut aussi  
5 être combinée avec un moyen pour produire un effet d'hystérésis sur les fronts d'ondes. Un tel moyen pour produire un effet d'hystérésis sur les fronts d'ondes produit une avance temporelle lors de l'activation d'un front d'ondes et/ou un retard temporel lors de la désactivation d'un front d'ondes.

### REVENDICATIONS

1 - Circuit de commande à modulation de largeurs d'impulsion MLI pour machine électrique polyphasée (1), comportant :

- 5 - un circuit convertisseur alternatif-continu réversible (4) connecté entre deux bornes d'alimentation continue (29P, 29N) et dont chaque borne commandée (23 – 25) est destinée à être connectée à au moins une phase du stator (2) de la machine électrique (1) ;
- 10 - une pluralité de capteurs (6, 7) destinés à mesurer le courant et/ou la tension dans chaque phase de ladite machine électrique ;
  - un moyen (9, 10) pour produire une information instantanée sur la position et la vitesse de rotation du rotor (3) de la machine électrique ;
- 15 - un circuit de pilotage (14) des branches du circuit convertisseur alternatif-continu (4) en fonction des mesures électriques dans les phases et de la position et de la vitesse du rotor ;

caractérisé en ce qu'il comporte aussi un circuit (11, 13) générateur de signaux de configuration du circuit de pilotage des  
20 branches du circuit convertisseur alternatif-continu (4) en fonction du mode désiré de fonctionnement de la machine électrique pris parmi les modes de fonctionnement comme démarreur, moteur électrique d'entraînement, moteur électrique de renfort, alternateur ou alternateur de récupération d'énergie mécanique  
25 de freinage.

2 – Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit (10) de détection de rotation produit un premier signal ( $\theta$ ) représentatif de l'angle de rotation instantanée du rotor par  
30 rapport à une position de référence et un second signal ( $\omega$ ) représentatif de la vitesse angulaire de rotation du rotor.

3 – Circuit selon la revendication 2, caractérisé en ce que le circuit (10) de détection de rotation est connecté à des entrées



d'un circuit (11) qui produit d'une part un signal de commande de commutation par une ligne (28) à destination d'un circuit hacheur (5) connecté à l'excitation du rotor (3) et d'autre part une pluralité de signaux de référence à destination d'un circuit (13) générateur de signaux de pilotage à destination du pont d'alimentation (4) du stator (2) de la machine électrique (1).

4 – Circuit selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comporte aussi un circuit (15) générateur d'une onde de base connectée à une borne d'entrée du circuit (13) générateur de signaux de pilotage.

5 – Circuit selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'onde de base est constituée par une onde de forme triangulaire, qui présente un premier front croissant à une première vitesse et un second front décroissant à une seconde vitesse.

6 – Circuit selon la revendication 5, caractérisé en ce que le circuit (13) générateur de signaux de pilotage produit une pluralité de signaux de pilotage (C1, C2 et C3) qui sont connectés à des entrées d'un circuit d'adaptation (14) pour produire des signaux de mise en conduction (P1 à P6) des grilles des différents interrupteurs semi-conducteurs du pont (4).

7 – Circuit selon la revendication 6, caractérisé en ce que le circuit (13) comporte pour au moins une partie des phases du stator un soustracteur (31, 34) dont une première borne d'entrée positive est connectée à la borne d'entrée d'un des dits signaux de référence (S1, S2) et dont une seconde borne d'entrée négative est connectée à la borne d'entrée d'un des dits signaux de mesure (M1, M2), et dont la borne de sortie est connectée à une borne d'entrée d'un circuit de correction (32, 35) qui applique une fonction de correction F1() ou F2() qui est présenté à la sortie du circuit de correction (32) sous la forme :

$$A1 = F1(S1 - M1).$$

8 - Circuit selon la revendication 7, caractérisé en ce que le signal de sortie (A1) issu du circuit de correction (35) est appliqué à une première borne d'entrée d'un comparateur (33, 36) dont une seconde borne d'entrée de comparaison est connectée à la sortie du circuit (15) générateur du signal de pilotage et qui permet de faire changer l'état de conduction de l'interrupteur commandé (16, 17) à l'électrode de grille duquel la borne de sortie du comparateur (33, 36) est connectée.

9 - Circuit selon la revendication 7, caractérisé en ce que les bornes de sortie des deux circuits de correction (32, 35) sont aussi connectées à des bornes d'entrées respectives d'un additionneur (37) dont la borne de sortie est appliquée à une première borne d'entrée d'un comparateur (38) dont une seconde borne d'entrée de comparaison est connectée à la sortie du circuit (15) générateur du signal de pilotage, et en ce que la borne de sortie du comparateur (38) délivre un signal pour faire changer l'état de conduction de l'interrupteur commandé (18) à l'électrode de grille duquel la borne de sortie du comparateur (38) est connectée.

10 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il coopère avec un moyen de détection d'un mode de fonctionnement comme un moyen de décodage d'une commande appliquée à la machine électrique à un ordinateur de bord décidant du fonctionnement parmi l'un des modes suivants :

- un mode de fonctionnement comme démarreur du moteur thermique ;

- un mode de fonctionnement comme alternateur pour recharger la batterie électrique connectée au réseau de bord d'alimentation en tension continue ;

- un mode de fonctionnement comme un moteur d'entraînement travaillant directement sur les roues du véhicule ou indirectement en venant mélanger sa puissance mécanique fournie à la puissance mécanique fournie par le reste du groupe motopropulseur ;

- un mode de fonctionnement comme génératrice travaillant en récupération de l'énergie de freinage demandé par le groupe motopropulseur.

10            11 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que, dans un des modes de moteur, pour augmenter le couple disponible sur le rotor il comporte un moyen pour augmenter le courant dans le stator pour un nombre  $n_s$  de tour des bobines au stator déterminé et un moyen pour renforcer le courant dans le  
15            stator lorsque la vitesse de rotation du rotor est élevé.

12 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que, dans un des modes de fonctionnement en alternateur :

(a) pour pouvoir débiter un courant au réseau en créant  
20            une force électromotrice  $e$  supérieure à la tension de la batterie pour des vitesses faibles jusqu'à une vitesse suffisante pour passer en mode de redressement à diodes ;

(b) au-delà d'une vitesse de rotation déterminée,  
il comporte un moyen pour limiter le courant demandé à la  
25            batterie.

13 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit 11 générateur de signaux de référence comporte un programme pour son fonctionnement en mode moteur selon deux  
30            zones (zone A et zone B) déterminée par une vitesse limite ( $\Omega_L$ ).

14 - Circuit selon la revendication 13, caractérisé en ce que, en mode de démarreur DEM, il comporte un moyen pour déterminer une modulation en largeur d'impulsions qui présente

un couple de sortie constant pour une vitesse de rotation  $W$  variant de la vitesse nulle à une vitesse limite, puis qui présente une décroissance à puissance constante jusqu'à une vitesse maximale.

5

15 - Circuit selon la revendication 13, caractérisé en ce que, en mode d'aide ASS, il comporte un moyen pour déterminer une modulation en largeur d'impulsions qui présente un couple de sortie décroissant linéairement à partir d'une vitesse déterminée de séparation ( $\Omega L$ ) entre des zones (A et B) correspondant  
10 avantageusement au ralenti du moteur thermique jusqu'à environ 7.000 tours par minutes.

16 - Circuit selon la revendication 13, caractérisé en ce que lorsque la machine commence à fonctionner en mode moteur  
15 il comporte un circuit supplémentaire (53) pour détecter quand la tension générée par la batterie (50) est supérieure à la moitié d'une valeur nominale  $U_0$  de fonctionnement de la batterie (50) avec une tension de garde  $\Delta U$  prédéterminée.

20

17 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que le moyen pour produire des signaux de référence pour le contrôle du stator comporte aussi un moyen pour recevoir une commande de configuration de charge, qui peut être fournie par un ordinateur  
25 de contrôle du groupe motopropulseur et/ou du véhicule complet pour déterminer si la machine doit travailler à pleine charge ou à charge réduite.

18 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que  
30 le moyen pour produire des signaux de référence pour le contrôle du stator comporte aussi un moyen pour placer le circuit de commande 13 dans un état tel que le pont 4 produise une onde sinusoïdale présentant une avance de phase comprise entre 90 et 180° d'angle en mode alternateur.

19 – Circuit selon la revendication 1 caractérisé en ce que, en mode alternateur, il comporte un moyen pour déterminer par un moyen d'enregistrement d'une valeur limite  $\Omega D$  de la vitesse de rotation du rotor deux zones de fonctionnement en vitesses :  
5 une zone C pour les vitesses inférieures à la vitesse limite  $\Omega D$  et une zone D pour les vitesses supérieures à  $\Omega D$ , la vitesse limite étant déterminée par le régime commun lorsque la machine travaille en modulation de largeur d'impulsions (partie de courbe 60) et lorsqu'elle travaille en redressement passif avec des diodes intrinsèques seulement (partie de courbe 62).

20 – Circuit selon la revendication 1 caractérisé en ce que, en mode alternateur, il comporte un moyen pour faire travailler le circuit de conversion ou bien dans un régime en modulation de  
15 largeur d'impulsions pour les régimes inférieurs à  $\Omega D$  ou bien seulement en redressement par diodes pour les régimes supérieurs à  $\Omega D$ .

20 21 - Circuit selon la revendication 1 caractérisé en ce que le moyen (11) pour générer les signaux de référence (S1 et S2) pour le contrôle du stator et/ou le signal de commande (If) du courant rotorique comporte un circuit (27) qui comporte une mémoire de données dotée d'un moyen pour générer des  
25 séquences de données en fonction d'un argument basé sur la vitesse de rotation instantanée du rotor et du mode de fonctionnement choisie de la machine électrique.

22 – Circuit selon la revendication 21, caractérisé en ce  
30 que le circuit (27) à mémoire est programmé selon les transformées de Clarke et de Park pour déterminer le triplet de paramètres  $\{I_s, I_R, \psi\}$  qui décrit l'état électrique du stator et du rotor dans divers repères tournants avec la vitesse de rotation

instantanée du rotor élaborée par la borne de sortie correspondante du circuit (10).

23 – Circuit selon la revendication 22, caractérisé en ce  
5 que les signaux représentatifs du courant au stator et de l'angle électrique ( $I_s$  et  $\Psi$ ) sont transmis à deux premières portes d'entrée d'un circuit (26) dont une troisième porte est connectée à la sortie correspondante du circuit 10 qui élabore un signal représentatif de l'angle instantané de rotation du rotor ( $\theta$ ) et en ce  
10 que le circuit (26) comporte un moyen pour produire une pluralité de signaux de référence ( $S_1$ ,  $S_2$ , ...) pour déterminer la modulation en largeur d'impulsion à l'aide de l'onde de découpage produite par le circuit 15.

15 24 - Circuit selon la revendication 23, caractérisé en ce que le circuit (26) pour produire des signaux de référence comporte des moyens pour générer des signaux de référence selon la relation courante définie par :

$$S_i = S_i(I_s, \Psi, I_R)$$

20 où  $S_i()$  est une fonction prédéterminée.

25 25 - Circuit selon la revendication 23, caractérisé en ce que le circuit (26) pour produire des signaux de référence comporte des moyens réalisés sous forme d'un programme exécuté par un circuit de traitement de signal de genre DSP (Digital Signal Processing de type Harvard).

30 26 - Circuit selon la revendication 23, caractérisé en ce que le circuit (26) pour produire des signaux de référence comporte des moyens pour générer le signal de référence courant  $S_i()$  par un séquenceur qui adresse, en fonction du triplet d'arguments ( $I_s$ ,  $\Psi$ ,  $I_R$ ), une table de valeurs numériques

représentant une cartographie déterminé par avance lors du chargement du circuit de commande.

27 – Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que  
5 la machine électrique peut être une machine à rotor à griffes de type Lundell, à pôles saillants, une machine à aimants permanents au rotor une machine à induction ou à réluctance variable, une machine à griffes à aimants interpolaires ou une machine à rotor hybride réalisé en tôles feuilletés et à pôles  
10 lisses avec bobinage d'excitation et des aimants permanents.

28 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour commander la machine électrique dans toute la gamme des vitesses de rotation du rotor.

15

29 - Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il coopère séparément ou en combinaison avec :

- un moyen pour empêcher le calage du moteur thermique ;
- un moyen de régulation de la vitesse du véhicule dans le  
20 mode de démarrage,
- un moyen de régulation de la puissance électrique disponible sur le réseau de bord du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- un moyen de régulation de la puissance mécanique du  
25 groupe motopropulseur du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- un moyen de lissage des écarts de décélération et d'arrêt du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- 30 - un moyen de lissage des variations de couple demandé au groupe motopropulseur du véhicule sur lequel la machine électrique et le circuit de commande de l'invention sont montés ;
- un moyen pour adapter le courant dans les phases de la machine électrique en fonction d'au moins l'état de charge de la

batterie du véhicule, du niveau d'énergie thermique et de tout autre paramètre de mesure de l'environnement du véhicule.

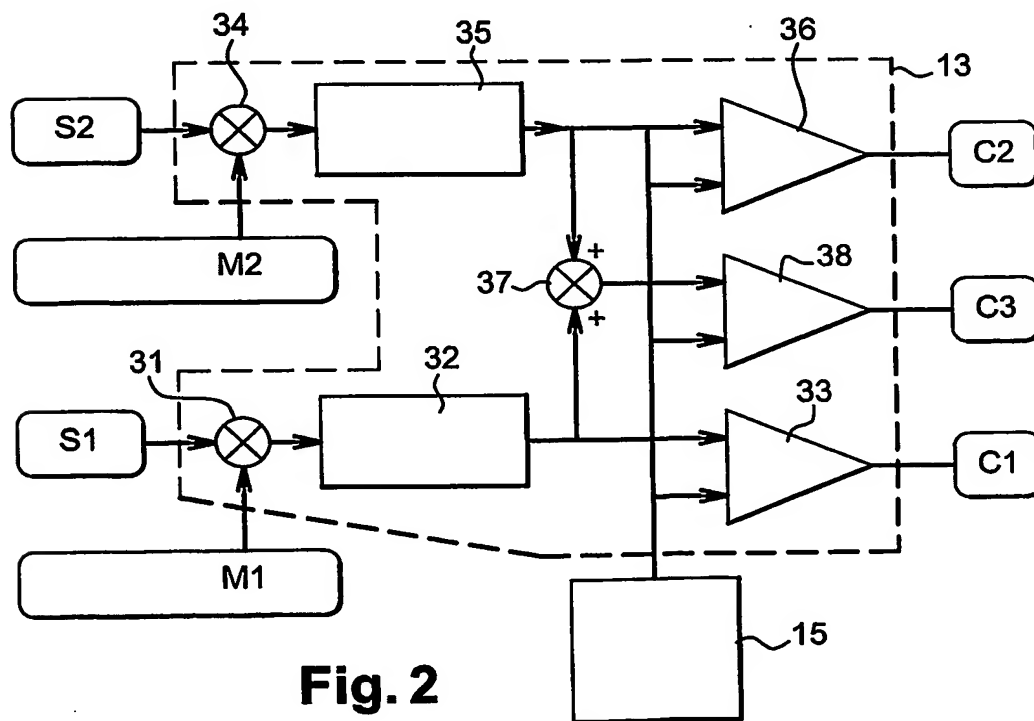
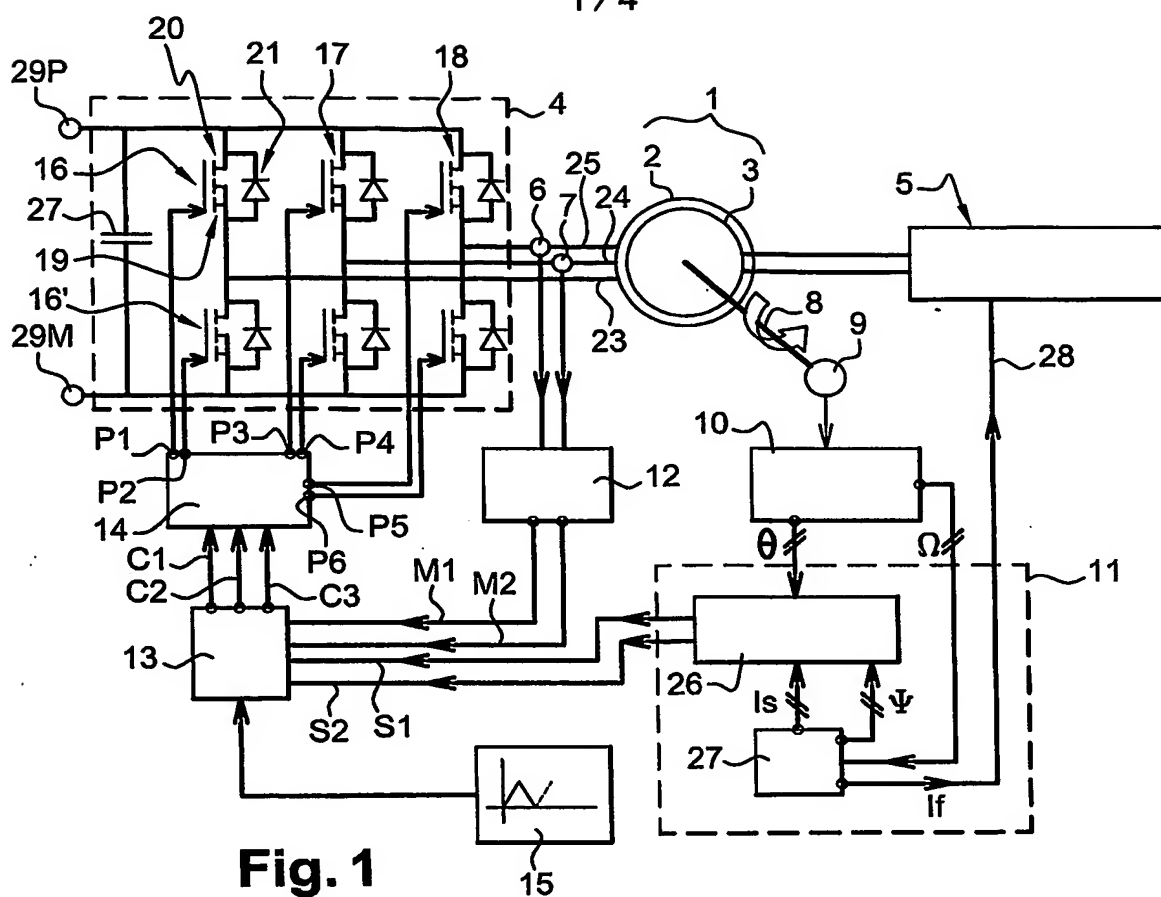
30 - Circuit selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le circuit (15) générateur de forme d'ondes produit une forme d'onde en dents de scie (Figure 4, (a) et (b)), en triangle (Figure 3, (c) et (d)) ou trapézoïdale (Figure 3, (e) et (f)) ou encore avec un contrôle vectoriel de type FOC, ou en ce que la forme d'onde est combinée avec un moyen pour produire un effet d'hystérésis sur les fronts d'ondes.

31 - Machine électrique pour véhicule, pouvant fonctionner comme démarreur, moteur électrique d'entraînement, moteur électrique de renfort, alternateur ou alternateur de récupération d'énergie mécanique de freinage et adaptée à fonctionner avec un circuit de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comporte un stator bobiné dont le nombre de spires est calculé sur la base d'une énergie de magnétisation plus faible et en ce que pour les modes de fonctionnement demandant une énergie de magnétisation plus élevée, on applique un contrôle en courant au moyen du circuit de commande.

32 - Machine électrique tournante pour véhicule caractérisée en ce qu'elle comporte un circuit de commande selon l'une quelconque des revendications 1 à 30.



1 / 4



2 / 4

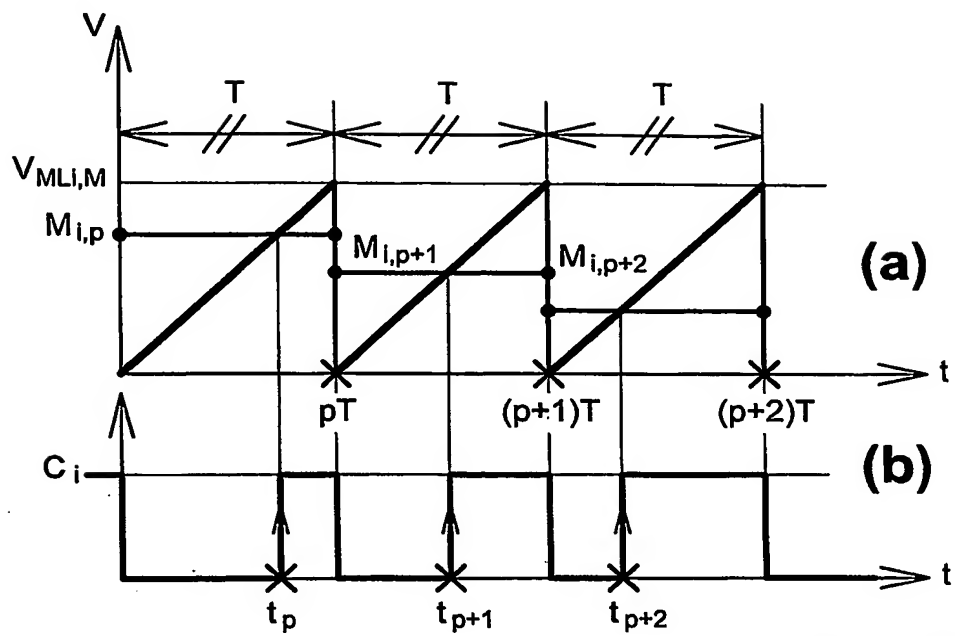
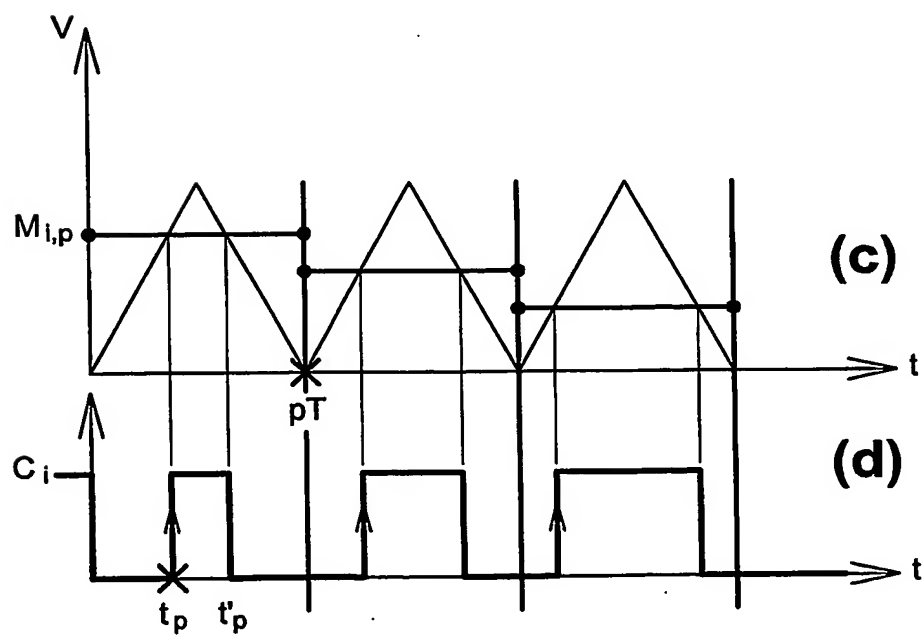


Fig. 3



3 / 4

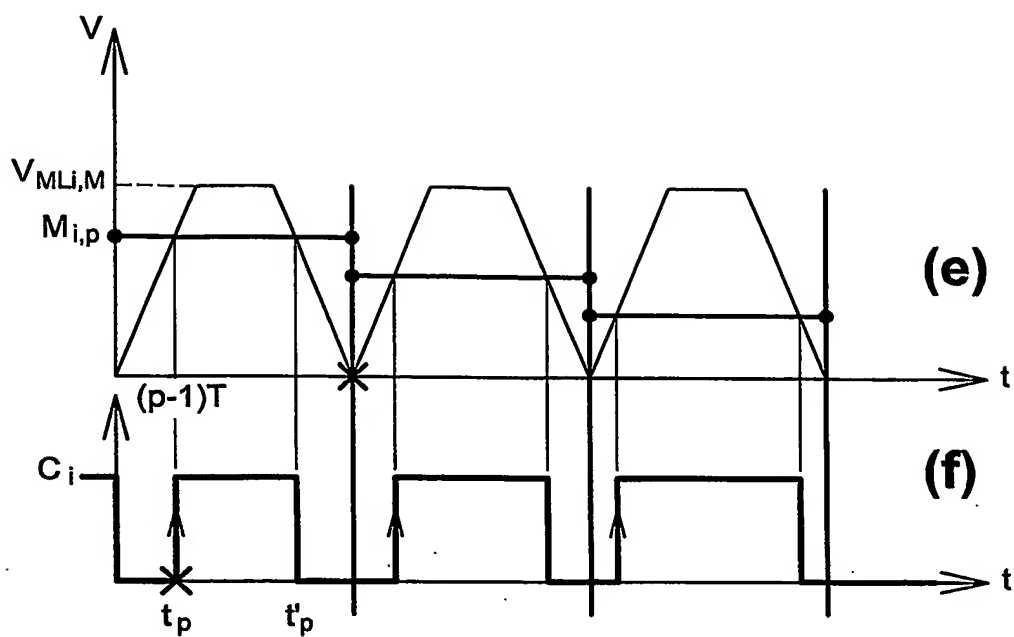


Fig. 3

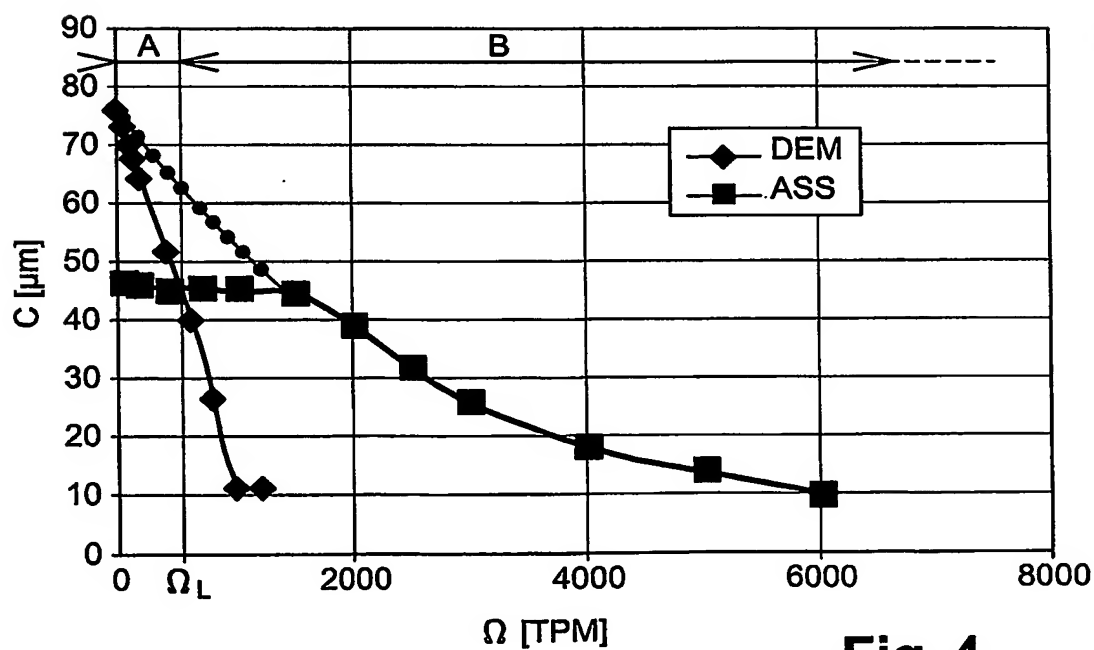
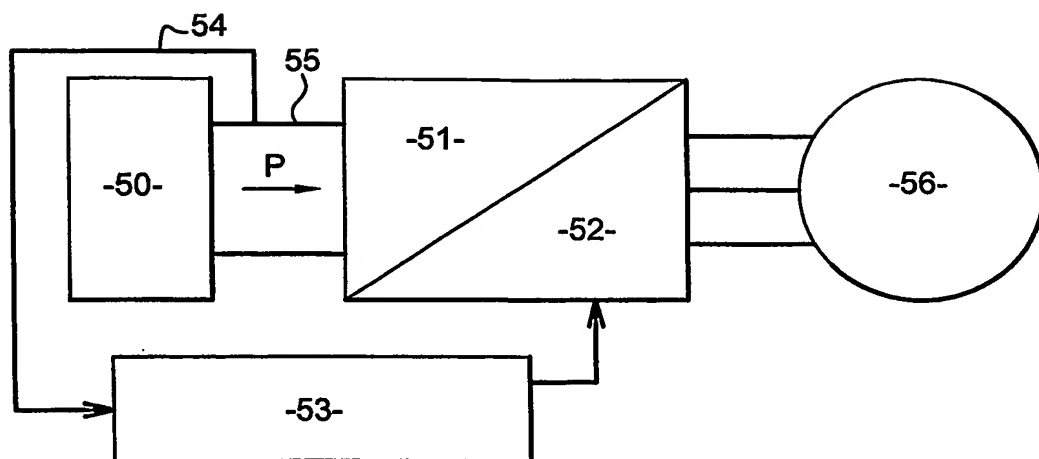
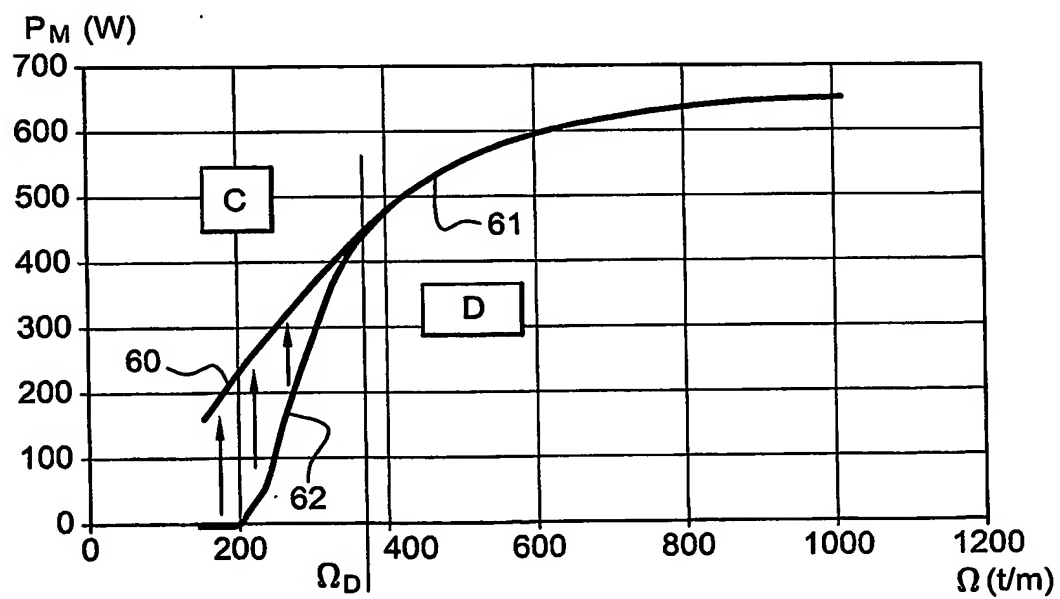


Fig. 4

4 / 4

**Fig. 5****Fig. 6**